

Simulation de la recharge artificielle de nappe en oued par un modèle à réservoirs

Use of a reservoir model to simulate artificial groundwater recharge

Y. Nazoumou et M. Besbes

Volume 13, numéro 4, 2000

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705399ar>
DOI : <https://doi.org/10.7202/705399ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Nazoumou, Y. & Besbes, M. (2000). Simulation de la recharge artificielle de nappe en oued par un modèle à réservoirs. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 13(4), 379–404. <https://doi.org/10.7202/705399ar>

Résumé de l'article

Dans la zone semi-aride de Tunisie centrale, un grand barrage a été construit en 1982 sur l'oued Zeroud, dont l'infiltration des crues naturelles constituait jadis la principale source d'alimentation des nappes de la plaine de Kairouan. Ce barrage est destiné à l'écrêtement des crues, l'irrigation et à la recharge des nappes à l'aval de la retenue.

Entre 1988 et 1996, plus de 70 millions de m³ d'eau ont été mobilisés sous forme d'ondes de lâchers à partir du barrage pour la recharge artificielle par infiltration dans le lit de l'oued. Le suivi des ondes de lâchers est effectué sur 3 stations de contrôle disposées sur une distance de 40 km le long du lit. L'analyse de l'évolution des débits a révélé que la capacité d'infiltration du lit augmente progressivement avant de se stabiliser, mettant en évidence l'effet de l'air sur le processus de recharge.

Un modèle conceptuel à réservoirs conjuguant fonctions de production et de transfert avec discrétisation spatiale a permis de modéliser la propagation et l'infiltration des ondes de lâchers le long de l'oued. Son ajustement sur un échantillon de six événements de lâchers a fourni des résultats satisfaisants. Même si la validation reste insuffisante en raison de la rareté des données, ce modèle peut constituer un premier outil d'évaluation de l'efficacité de la recharge et de prédiction de son impact sur la nappe souterraine de la plaine de Kairouan.

Simulation de la recharge artificielle de nappe en oued par un modèle à réservoirs

Use of a reservoir model to simulate artificial groundwater recharge

Y. NAZOU MOU *, M. BESBES **

Reçu le 17 septembre 1999, accepté le 13 décembre 2000***.

SUMMARY

In semi-arid central Tunisia, flood infiltration through the streambed of the ephemeral Zeroud Wadi has long been the principal mechanism of recharging aquifers beneath the plains of the city of Kairouan. In addition to controlling infiltration, a dam built on the Zeroud in 1982 to supply water to Kairouan also protects the city from floods.

From 1988 to 1996 over 70 million cubic meters of dam-held water were mobilized in the form of flood waves over the stream channel to recharge the Kairouan aquifers. Analysis of flow discharges measured at three control stations spanning 40 km of the stream reveals that infiltration is reduced during initial flood-wave spreading and increases gradually before stabilizing. The differential rate of infiltration is thought to be caused by interstitial air initially present.

A conceptual reservoir model based on production and transfer functions with spatial discretization was used to simulate flood-wave propagation and infiltration along the Zeroud. After calibration with six flood events the model produced satisfactory results. Though current data scarcity prevents its validation, the model constitutes a prototype for the evaluation of recharge efficiency and for the prediction of recharge impact on Kairouan aquifers.

Key-words: *wave propagation, infiltration, air effects, groundwater recharge, reservoir model, semi-arid zone.*

Laboratoire de modélisation en hydraulique et environnement, École nationale d'ingénieurs de Tunis, BP 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie.

* Correspondance. E-mail : yahaya.nazoumou@enit.rnu.tn

** mustapha.besbes@enit.rnu.tn

*** Les commentaires seront reçus jusqu'au 14 septembre 2001.

RÉSUMÉ

Dans la zone semi-aride de Tunisie centrale, un grand barrage a été construit en 1982 sur l'oued Zeroud, dont l'infiltration des crues naturelles constituait jadis la principale source d'alimentation des nappes de la plaine de Kairouan. Ce barrage est destiné à l'écrêtement des crues, l'irrigation et à la recharge des nappes à l'aval de la retenue.

Entre 1988 et 1996, plus de 70 millions de m³ d'eau ont été mobilisés sous forme d'ondes de lâchers à partir du barrage pour la recharge artificielle par infiltration dans le lit de l'oued. Le suivi des ondes de lâchers est effectué sur 3 stations de contrôle disposées sur une distance de 40 km le long du lit. L'analyse de l'évolution des débits a révélé que la capacité d'infiltration du lit augmente progressivement avant de se stabiliser, mettant en évidence l'effet de l'air sur le processus de recharge.

Un modèle conceptuel à réservoirs conjuguant fonctions de production et de transfert avec discrétisation spatiale a permis de modéliser la propagation et l'infiltration des ondes de lâchers le long de l'oued. Son ajustement sur un échantillon de six événements de lâchers a fourni des résultats satisfaisants. Même si la validation reste insuffisante en raison de la rareté des données, ce modèle peut constituer un premier outil d'évaluation de l'efficacité de la recharge et de prédiction de son impact sur la nappe souterraine de la plaine de Kairouan.

Mots clés : propagation de crue, infiltration, effet de l'air, recharge de nappe, modèle à réservoirs, zone semi-aride.

1 – INTRODUCTION

Avec une superficie de 3 000 km², la plaine de Kairouan est le plus grand bassin aquifère de la Tunisie centrale. Dans cette région semi-aride où la pluviométrie moyenne annuelle n'excède pas 300 mm/an, l'infiltration des eaux de crues des cours d'eau intermittents que sont les oueds Zeroud et Merguellil constitue le mécanisme le plus important de la recharge des nappes auxquelles ils sont associés. La maîtrise et la mobilisation des ressources en eau dans cette région caractérisée par l'irrégularité de ses précipitations ainsi que le caractère dévastateur des crues qui en découlent passent par une gestion conjointe de ses eaux superficielles et souterraines. Bien que s'inscrivant dans cette optique, la construction du barrage de Sidi Saâd sur l'oued Zeroud en 1982 et de celui d'El Haouareb sur l'oued Merguellil en 1988, conjuguée à l'exploitation sans cesse croissante des nappes, a eu pour conséquence un abaissement inquiétant des niveaux piézométriques. Pour pallier à ce déséquilibre, la recharge artificielle a été entreprise à partir de 1988, grâce à des campagnes de lâchers des eaux de barrages sur les lits des oueds, sous forme d'ondes de lâchers. Au total plus de 1 500 heures de lâchers suivies grâce à près de 1 000 jaugeages de débits au niveau de 3 stations de contrôle ont été effectuées entre 1988 et 1996 sur le Zeroud par les équipes de la Direction générale des ressources en eaux (DGRE).

L'objectif de la présente étude est de proposer, après analyse préliminaire de cette importante masse de données, un modèle de propagation et d'infiltration des lâchers permettant de prédire le bilan hydrique de la recharge.

des eaux de crues des oueds Zeroud et Merguellil dont les bassins versants situés en amont de la plaine s'étendant respectivement sur 8 600 et 1 100 km². Ces oueds parcourent la plaine sur respectivement 40 et 30 km de tronçons favorables à l'alimentation des nappes. La *figure 2* présente une coupe lithologique simplifiée le long du lit de l'oued Zeroud, dressée à partir des forages peu profonds. La zone non saturée sous le lit de l'oued a une épaisseur variable, entre 5 et 50 mètres. En amont de la station AER, cette zone est essentiellement constituée de formations très perméables (sables, graviers et galets) tandis qu'en aval, elle devient plus argileuse jusqu'à la hauteur de la ville de Kairouan. Les eaux d'étiage s'infiltrent entièrement à l'entrée de la plaine et les relevés piézométriques réalisés sur plusieurs années ont mis en évidence la participation importante des crues dans la recharge des nappes (BESBES, 1978). Le reste des apports à la nappe est constitué par l'infiltration directe aux piedmonts des reliefs de bordures.

Les exutoires du système hydrogéologique sont formés d'une part par les limites hydrauliques que sont les sebkhas de bordures Chérta et El Hani, et d'autre part par les prélèvements dans les puits de surface et les forages à des fins agricoles, industrielles et pour l'alimentation en eau potable. L'exploitation des 3 800 puits de la nappe phréatique est estimée à 26 millions de m³/an (DGRE, 1990) tandis que les 130 forages qui captent la nappe profonde produisent eux-mêmes 26 millions de m³/an (DGRE, 1996). Cette exploitation excessive des eaux souterraines associée au déficit de recharge lié à la construction des barrages a provoqué une baisse importante des niveaux piézométriques, précipitant en cela le recours à l'alimentation artificielle en vue de rééquilibrer le système.

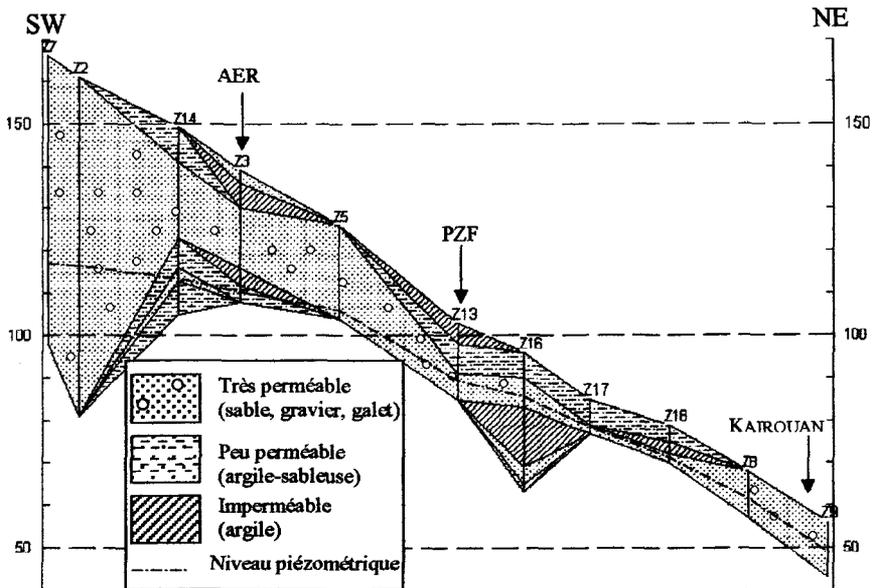


Figure 2 Coupe lithologique simplifiée de la zone non saturée sous le lit de l'oued Zeroud.

Simplified lithologic cross section of the unsaturated zone below wadi Zeroud.

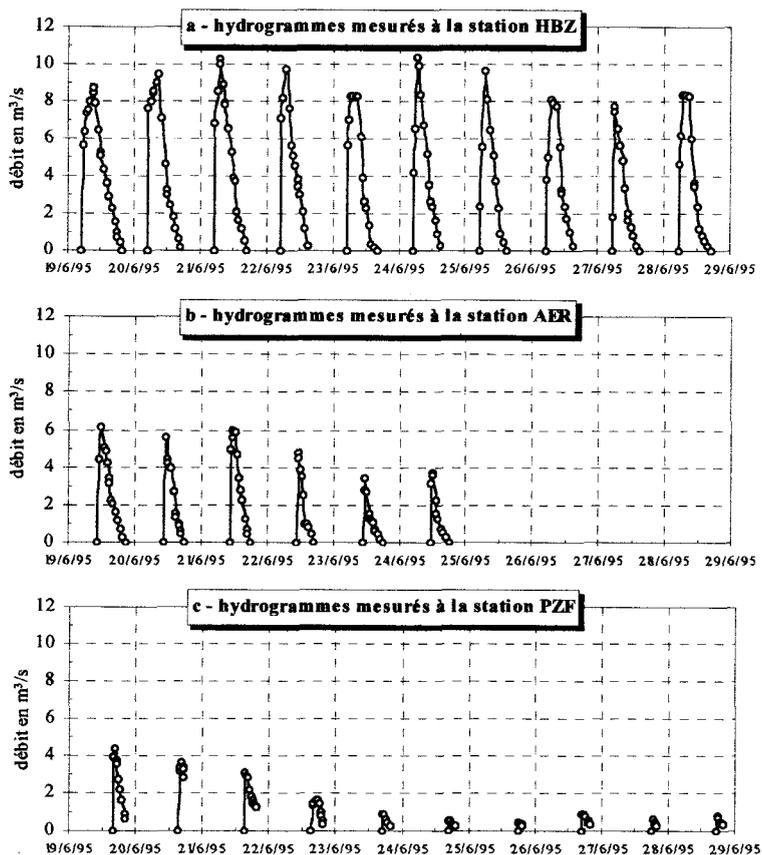


Figure 3 Hydrographes mesurés du 19 au 28 juin 1995 aux stations de contrôle : a : Henchir Bouzid (HBZ) ; b : Argroup Erremth (AER) ; c : Pont Zaâfrana (PZF).

Measured hydrographs from 19 to 28 June 1995 at the control stations: a: Henchir Bouzid (HBZ); b: Argroup Erremth (AER); c: Pont Zaâfrana (PZF).

3 – RECHARGE ARTIFICIELLE DES NAPPES DE LA PLAINE DE KAIROUAN

L'alimentation artificielle des nappes de la plaine de Kairouan répond au double objectif de restauration des nappes perturbées par la surexploitation, et celui d'un accroissement des ressources par stockage souterrain. La recharge artificielle est réalisée depuis 1988, grâce à des campagnes de durée limitée en fonction des ressources disponibles aux barrages. Une campagne est définie comme un événement de lâcher d'eau du barrage en continu ou par ondes successives, pendant plusieurs jours consécutifs (quelques jours à deux mois)

dans le lit de l'oued pour la recharge de la nappe. La durée de l'onde varie entre 30 minutes et 16 heures et le protocole de lâchure est motivé par le souci de minimiser les pertes dues à l'évaporation dans la plaine et au ruissellement à l'aval de la zone d'alimentation des nappes. Le suivi des ondes lâchées et de leur amortissement le long du lit est assuré grâce à des mesures de débits par jaugeage au niveau de trois stations de contrôle choisies à cet effet, indiquées sur la *figure 1*. Au total 6 campagnes de recharge artificielle ont été réalisées entre 1988 et 1996 dont une seule dans le Merguellil à partir du barrage El Haouareb. Ces campagnes ont fait l'objet de plus de 1 000 jaugeages de débit et ont mobilisé au total près de 90 millions de m³ d'eau dont 70 millions à partir du seul barrage de Sidi Saâd (SAADAoui et al., 1989 ; BOUZAIANE et al., 1993 ; ADJELI et CHADLY, 1995 ; CHAIEB et al., 1995). Cependant, la régularité et le nombre des mesures effectuées varient d'une campagne à l'autre rendant ainsi difficile une analyse exhaustive des données, à l'exception de celles de la campagne de 1995 sur l'oued Zeroud pour laquelle on dispose d'un suivi relativement régulier. Ces dernières serviront de référence pour le calage et la validation du modèle proposé. Cette campagne a duré un mois, soit du 19 juin au 19 juillet 1995, période au cours de laquelle 61 ondes de lâchers couvrant 406 heures ont été émises, pour un volume mobilisé de 15 millions de m³. Les mesures de contrôle de débit ont été réalisées au niveau des stations de Henchir Bouzid (HBZ), Argoub Erremth (AER) et Pont Zaâfrana (PZF) disposées le long du lit de l'oued (*figure 1*). La *figure 3* présente les hydrogrammes mesurés du 19 au 28 juin 1995 aux trois stations. Sur deux ondes lâchées quotidiennement durant la campagne, seule l'onde diurne a été suivie, avec toutefois des lacunes, particulièrement au niveau des stations AER et PZF. Les débits relativement faibles correspondant à la phase de tarissement de l'hydrogramme de l'onde sont difficilement mesurables même au micro-moulinet, ce qui a pour conséquence une mauvaise estimation des apports d'ondes de crue, particulièrement à la station la plus en aval.

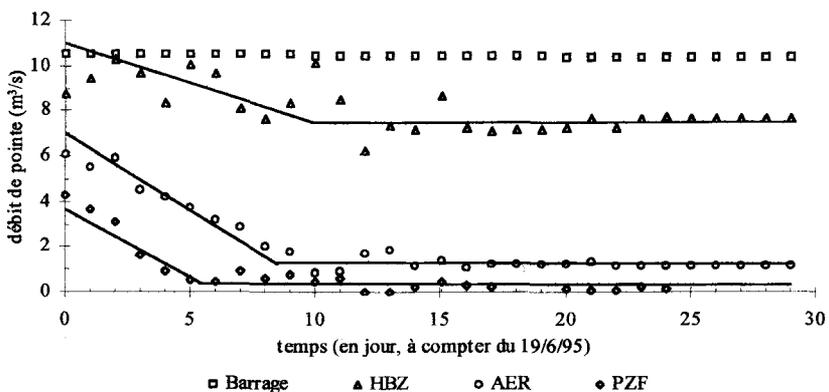


Figure 4 Débits de pointe mesurés aux stations de contrôle.

Maximum peaks of flow measured at the control stations.

L'évolution des débits de pointe mesurés aux stations durant toute la campagne est illustrée sur la *figure 4*. Elle montre que pour un même débit moyen de lâcher au barrage, le débit de pointe décroît progressivement durant les

premiers jours de la campagne, avant d'atteindre une valeur relativement constante autour de laquelle il va se stabiliser. Cette décroissance du débit dénote d'une variation des propriétés d'infiltration dans le lit de l'oued et à travers la zone non saturée. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce phénomène : La première est celle de l'existence dans le lit d'une croûte formée de matériaux fins de conductivité hydraulique plus faible que celle du profil du lit, déposée suite au dévasement de la retenue du barrage et qui sera détruite progressivement par les premières ondes de crues. Étant donné qu'aucun écoulement n'a été observé sur le lit de l'oued au cours des huit mois précédant la campagne considérée, cette hypothèse a été ici écartée.

La deuxième hypothèse est que la submersion quasi-instantanée du lit par les eaux des premières ondes de crues n'a pas permis à l'air contenu dans les pores de s'échapper. Celui-ci se trouve ainsi comprimé, avec pour conséquence une réduction de la capacité d'infiltration du lit qui se traduit par un ruissellement plus brutal et plus important (VACHAUD *et al.*, 1973 ; MOREL-SEYTOUX et BILLICA, 1985 ; WEIR et KISSLING, 1992). À la faveur du temps d'arrêt de lâchers entre deux ondes successives (diminution de charge à la surface), l'air s'échappe progressivement entraînant une augmentation de la capacité d'infiltration de la zone non saturée jusqu'à sa valeur permanente à saturation.

Nombre d'observations sur le terrain et d'études au laboratoire (VACHAUD *et al.*, 1973, 1974 ; GRISMER *et al.*, 1994 ; WANG *et al.*, 1998) ont montré que dans le cas d'une infiltration en charge (ponded infiltration), la présence de l'air dans la zone non saturée a une influence négative sur la conductivité hydraulique du milieu poreux, donc sur le flux d'infiltration. Lorsque l'eau s'infiltré à travers la zone non saturée, l'air contenu dans les pores est déplacé et peut ainsi être comprimé en aval du front d'humidité. WANG *et al.* (1998) observent que l'air occlus réduit la conductivité hydraulique du milieu de 60 % et le flux moyen d'infiltration est de 3 à 10 fois inférieur par rapport aux conditions d'un drainage libre de l'air. Lorsque la pression de l'air devient suffisamment grande ou à la faveur d'une baisse de charge hydraulique, l'air comprimé s'échappe par la surface, entraînant une brusque augmentation du flux d'infiltration (VACHAUD *et al.*, 1974 ; WEIR et KISSLING, 1992 ; GRISMER *et al.*, 1994 ; WANG *et al.*, 1998).

Bien que plusieurs tentatives de modélisation mathématique aient été menées afin de simuler les effets complexes de l'air sur les propriétés de l'infiltration (MOREL-SEYTOUX et KHANDJI, 1974 ; MOREL-SEYTOUX et BILLICA, 1985 ; SANDER *et al.*, 1988), l'application à une échelle régionale des approches théoriques du processus est sérieusement handicapée par le manque de données et d'études de terrain. Quoiqu'il en soit cette variation de la capacité d'infiltration du lit de l'oued est un phénomène dont il faudra tenir compte lors de l'élaboration du modèle de propagation et d'infiltration des lâchers.

4 – MODÈLE DE PROPAGATION INFILTRATION DES LÂCHERS DANS LE LIT DE L'OUED

La propagation des ondes de crue en rivière est régie par les équations complètes de Saint-Venant qui décrivent la conservation de masse et de quan-

tité de mouvement. Dans les applications pratiques, on adopte généralement les modèles dits hydrologiques de Muskingum et Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969 ; PONCE et YEVJEVICH, 1978) ou des modèles hydrauliques simplifiés d'ondes cinématique ou diffusante déduits des simplifications des équations de Saint-Venant.

L'utilisation des modèles simplifiés rencontre néanmoins des difficultés liées d'une part à la définition des limites du domaine de leur application et d'autre part au choix de la méthode de résolution et des pas de discrétisation spatiale et temporelle adéquats. PONCE *et al.* (1978), DALUZ (1983) ou encore LAMBERTI et PILATI (1996) ont élaboré des critères définissant les conditions dans lesquelles l'application des modèles simplifiés fournit une approximation acceptable des équations de Saint-Venant. En se basant sur les caractéristiques hydrauliques du bief et le nombre de Froude de l'écoulement moyen, MOUSSA et BOCQUILLON (1996) ont également mis en exergue des critères permettant de déterminer les domaines de validité des modèles et aidant au choix de la méthode numérique de résolution et des pas de discrétisation spatiale et temporelle. D'une manière générale, le choix du modèle et de la méthode de calcul dépend essentiellement de la forme de l'hydrogramme d'entrée et des caractéristiques du bief. Dans le cas de la propagation en rivière naturelle, le modèle d'onde diffusant résolu par la méthode des différences finies s'avère être le mieux adapté (PONCE, 1990 ; MOUSSA et BOCQUILLON 1996).

Les paramètres des modèles de propagation, hydrologiques ou simplifiés, sont basés sur les caractéristiques géométriques du lit et des hydrogrammes d'entrée et de sortie (tirant d'eau, débit, pente, rugosité, surface ou périmètre mouillés). Les caractéristiques géométriques du lit d'un cours d'eau naturel sont très variables et leur estimation requiert d'importantes et parfois très onéreuses mesures de terrain (PARK, 1977 ; KOLBERG et HOWARD, 1995). Dans les régions arides et semi-arides, la part de l'infiltration est aussi considérable que celle du ruissellement, ce qui diminue l'intérêt des modèles classiques de propagation. En outre, les données nécessaires à l'application de tels modèles sur un bief naturel sont rarement disponibles (écoulement intermittent, lit pas toujours bien défini, absence de réseau de suivi adéquat). Dans ces conditions, un modèle conceptuel basé sur un nombre limité de paramètres peut avoir des avantages indéniables dès lors qu'il aboutit à des résultats opérationnels.

4.1 Principe du modèle

Pour schématiser le cycle de l'eau dans un tronçon élémentaire du système oued/zone non saturée et réaliser un bilan hydrologique de la recharge, une approche basée sur le principe de la fonction de production « type sol » des modèles classiques à réservoirs a été adoptée (ROCHE, 1971 ; BESBES, 1978). Cette méthode a été déjà utilisée de façon satisfaisante par BESBES et BOUZAIANE (1984) puis EZZEDDINE et BESBES (1991) pour la modélisation de l'épandage des crues dans les zones semi-arides à l'aide du code MECRA (DJEJBI *et al.*, 1991).

La fonction de production a pour but de représenter de manière simple mais réaliste, la répartition de l'apport total à un tronçon élémentaire de l'oued que nous appellerons « maille » en évapotranspiration, infiltration, ruissellement, et stockage dans la zone non saturée (*figure 5*). Dans ces conditions l'infiltration nette ou recharge de la maille « i » est calculée à chaque pas de temps « t » à partir de l'équation du bilan hydrique :

$$I_i(t) = A_i(t) - ETR_i(t) - Re_i(t) - \Delta S_i(t) \quad (1)$$

Où I_i est l'infiltration nette ; A_i l'apport total ; ETR_i l'évapotranspiration réelle ; Re_i le ruissellement à l'aval de la maille et ΔS_i la variation de réserve en eau du sol.

Ce schéma conceptuel suppose une zone non saturée divisée en deux horizons comme indiqué sur la figure 5 :

- une zone d'échange ou zone d'évapotranspiration (le sol), d'épaisseur relativement faible de l'ordre du mètre et caractérisée par une réserve en eau très variable.
- une zone de percolation, d'humidité constante, égale à la capacité au champ de manière à garantir la conservation de la masse. L'entrée de cette zone est l'infiltration nette (I_i) qui « transférée » par la zone de percolation constituera l'alimentation de la nappe, infiltration différée dans le temps (BESBES et DE MARSILY, 1984).

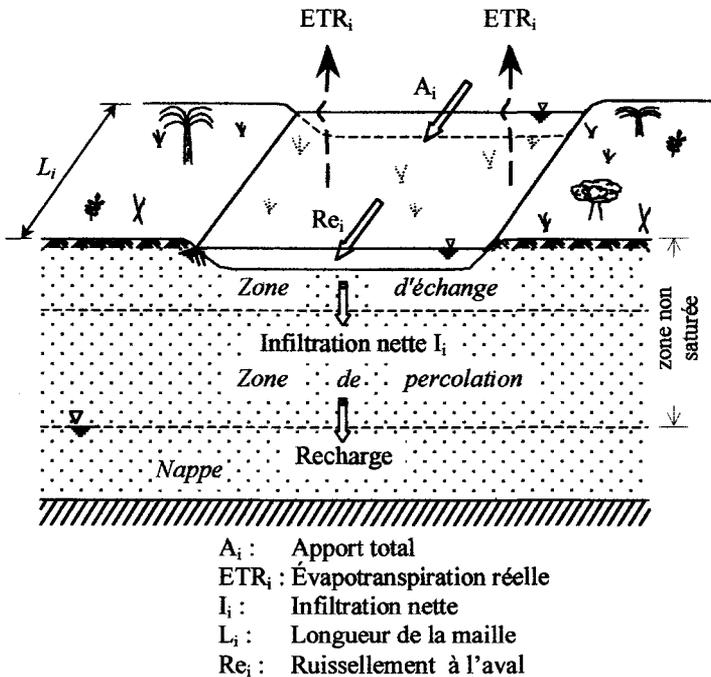


Figure 5 Schéma conceptuel d'un tronçon élémentaire de l'oued (maille).
Conceptual diagram of an elementary reach of the wadi.

Partant de ce concept, la fonction de production schématise de façon globale le fonctionnement de la zone d'échange et peut être représentée à l'aide de trois réservoirs en série comme indiqué sur la figure 6 (EZZEDDINE et BESBES, 1991) : un réservoir de bilan ou réservoir sol qui détermine l'apport efficace ou écoulement total E_i et deux réservoirs dits de transfert qui assurent le transfert de cet apport.

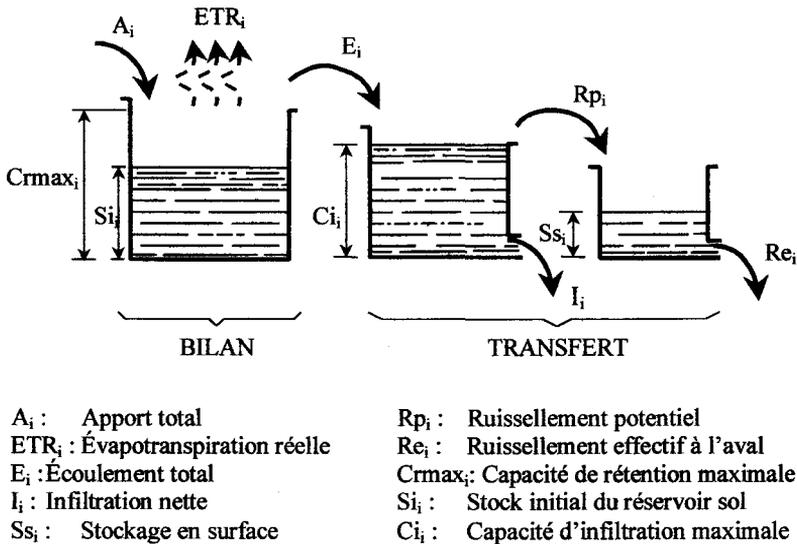


Figure 6 Schéma du principe de la fonction de production (zone d'échange).
Principle diagram of the function of production (exchange zone).

En fonction de l'évapotranspiration réelle ETR_i et des réserves d'eau du sol, le réservoir de bilan fonctionne suivant deux cas de figure :

- si l'apport total A_i à la maille est supérieur à l'évapotranspiration potentielle, l' ETR_i est égale à l'évapotranspiration potentielle ETP et l'excédent reconstitue l'humidité de la zone d'échange, jusqu'à sa capacité au champ ou capacité de rétention $Crmax_i$ au-delà de laquelle apparaît l'écoulement total E_i . Cet écoulement total ou apport efficace englobe l'infiltration nette, le ruissellement et le stockage dans la tranche superficielle de sol (zone d'échange) ;
- en revanche, si A_i est inférieur à ETP , il y a un déficit $A_i - ETP$ qui puisera dans la réserve du sol. Celle-ci sera reconstituée dès qu'il y a apport.

Les réservoirs de transfert ont pour rôle le transfert de l'apport efficace E_i sous forme de quantité infiltrée I_i , variation du stockage superficiel Ss_i et ruissellement à l'aval de la maille, Re_i . Cette répartition est réalisée par comparaison de l'apport efficace E_i au seuil maximal d'infiltration Ci_i , paramètre du réservoir, qui définit la quantité maximale pouvant s'infiltrer dans la maille par unité de temps. Il caractérise la perméabilité de la maille, et le ruissellement potentiel Rp_i ne survient que lorsque l'apport E_i est supérieur à ce seuil :

$$\begin{cases} I_i = Ci_i & \text{si } E_i \geq Ci_i \\ Rp_i = E_i - Ci_i & \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_i = E_i & \text{si } E_i < Ci_i \\ Rp_i = 0 & \end{cases} \quad (3)$$

Le dernier réservoir de transfert est à tarissement exponentiel et prend en compte le transfert de l'eau en surface ou propagation. Son fonctionnement est régi par l'équation de transfert superficiel (ROCHE, 1971 ; GIRARD, 1982 ; LEDOUX *et al.*, 1984) et le ruissellement à l'aval est donné par l'équation :

$$Re_i = Rp_i \cdot \exp(-\alpha_i \cdot t) \quad (4)$$

Où α_i est la constante de tarissement du réservoir de transfert superficiel ; Rp_i le ruissellement potentiel et Re_i ruissellement effectif à l'aval de la maille (figure 6).

Le stock d'eau à la surface ou submersion Ss_i s'écrit :

$$Ss_i = Rp_i - Re_i \quad (5)$$

Soit :

$$Ss_i = (1 - \exp(-\alpha_i \cdot t)) \cdot Rp_i \quad (6)$$

La largeur inondée du lit est un paramètre déterminant dans l'évaluation de l'évapotranspiration réelle. Lorsqu'il y a possibilité de mesures directes sur le terrain, les paramètres géométriques du lit peuvent être représentés de manière conceptuelle, formulée à base d'études géomorphologiques (ORLANDINI et ROSSO, 1998 ; KOLBERG et HOWARD, 1995). Afin de tenir compte de la variation de la surface inondée du lit et surtout faute de connaissances très précises sur la géométrie du lit de l'oued en cours de crue, une fonction empirique donnant la largeur inondée du lit peut être adoptée. Pour le cas de l'oued Zeroud, cette fonction s'exprime pour une maille « i » sous la forme suivante (EZZEDDINE et BESBES, 1991) :

$$l_i = \text{Min}(\beta_i \cdot \log_{10}(A_i + 1), l_{\text{max}}) \quad (7)$$

Où l_i est la largeur utile (inondée) du lit (m) ; β_i est la constante d'ajustement de la largeur inondée (m) ; l_{max} la largeur maximale du lit de l'oued (400 m).

Les principaux termes du bilan et des mécanismes de transfert sont définis pour une maille « i » au pas de temps « j » comme suit (EZZEDDINE et BESBES, 1991 ; NAZOU MOU, 1996) :

$$A_{i,j} = Re_{i-1,j} \quad (8)$$

$$ETR_{i,j} = \text{Min}(Si_{i,j-1} + A_{i,j}, ETP_i) \quad (9)$$

$$Si_{i,j} = \text{Min}(Si_{i,j-1} + A_{i,j} - ETR_{i,j}, C_{\text{max},i,j}) \quad (10)$$

$$E_{i,j} = \text{Max}(Si_{i,j-1} + A_{i,j} - ETR_{i,j} - C_{\text{max},i,j}, 0) \quad (11)$$

$$I_{i,j} = \text{Min}(E_{i,j}, Ci_{i,j}) \quad (12)$$

$$Rp_{i,j} = \text{Max}(E_{i,j} - Ci_{i,j}, 0) \quad (13)$$

$$Ci_{i,j} = K_{i,j} \cdot l_{i,j} \cdot L_i \quad (14)$$

Avec : L_i la longueur de la maille, indépendante du temps [L]

K_i la vitesse d'infiltration de la maille « i » [LT^{-1}]

Pour tenir compte de l'augmentation de la capacité d'infiltration mise en évidence par l'analyse de l'amortissement des débits de pointe et à défaut d'une relation de référence bibliographique, une loi de variation linéaire de K_i a été adoptée sous la forme (NAZOU MOU, 1996) :

$$K_i = K_{O_i} + \varepsilon t \quad \text{si } t < t_s \quad (15)$$

$$K_i = K_{S_i} \quad \text{si } t \geq t_s \quad (16)$$

Où ε est la pente de la droite de variation de K_i ; K_i la vitesse d'infiltration à l'instant t (mm/j); t le temps (j); K_{S_i} la vitesse d'infiltration stabilisée ou perméabilité à saturation du milieu poreux (mm/j); K_{O_i} la vitesse d'infiltration initiale (mm/j) et t_s délai de stabilisation de la vitesse K_p (j).

L'algorithme de propagation et infiltration considère l'oued et ses éventuels affluents principaux comme une arborescence de mailles se vidant les unes dans les autres d'amont vers l'aval. Chaque maille fonctionne comme une fonction de production telle que décrite plus haut et est alimentée par le débit sortant de celle qui la précède. Cette approche permet la discrétisation spatiale du lit de l'oued en mailles dont la longueur dépend des objectifs de précision recherchés et dont la largeur équivaut à la largeur inondée du lit. Le débit peut être simulé en plusieurs points du lit, offrant ainsi une possibilité de comparaison avec les mesures effectuées aux stations de contrôle hydrométrique. L'ensemble des mailles existant entre deux stations de contrôle successives forme un bief. L'ajustement du modèle ne reposant, à ce stade, que sur la reconstitution des débits observés, on aura tendance à conserver les mêmes paramètres des mailles à l'intérieur d'un même bief.

4.2 Paramètres du modèle

Le modèle ainsi défini possède quatre paramètres pour chaque bief, qui doivent être déterminés par calage :

- a) la constante d'ajustement de la largeur inondée du bief β ;
- b) la réserve facilement utilisable RFU qui définit la capacité maximale de rétention du réservoir sol C_{rmax} ;
- c) la vitesse d'infiltration K qui définit la capacité maximale d'infiltration C_i du bief. Le calage de ce paramètre revient à déterminer la vitesse d'infiltration initiale K_o et la perméabilité à saturation K_s ; t_s étant estimé par l'analyse de la courbe de décroissance des débits de pointe (figure 4) ;
- d) la constante de tarissement exponentiel du réservoir de transfert superficiel, α .

Le modèle est d'abord ajusté séparément sur chaque bief de l'oued. Les hydrogrammes d'entrée sont constitués par les débits mesurés à la station amont tandis que ceux observés à l'aval servent de valeurs de référence pour le calage. Les paramètres ainsi obtenus sont par la suite réajustés, si nécessaire, lors du calage sur tout le tronçon de l'oued. Pour le cas de Zeroud, aucun réajustement n'a été nécessaire.

4.3 Calage et validation du modèle

L'ajustement du modèle a été réalisé sur un échantillon de 6 ondes de crues observées au niveau des trois stations de contrôle, alors que 12 ondes ont été lâchées au barrage durant la même semaine du 19 au 24 juin 1995. Au-delà de cette période, la qualité et l'irrégularité des mesures rendent difficile toute tentative d'extension de la période de référence. Au total trois biefs prin-

cipaux ont été définis le long de l'oued (NAZOUYOU, 1996). Le bief 1 d'une longueur de 15 km correspond à la plaine d'El Bhira, située entre le site du barrage de Sidi Saâd et la station HBZ (*figure 1*). La structure d'El Bhira est indépendante du système aquifère de la plaine de Kairouan. Elle renferme un aquifère à salinité élevée et n'est de ce fait pas concernée par la recharge. Les volumes infiltré et évaporé dans cette zone seront donc considérés comme des pertes dans le bilan de la recharge. Le bief 2 et le bief 3 de longueurs respectives 15 km et 10 km forment le tronçon de l'oued favorable à l'alimentation des nappes et sont contrôlés à la sortie par respectivement les stations de Argoub Erremth (AER) et Pont Zaâfrana (PZF). Le calage du modèle sur le bief 1 est indispensable puisqu'il permettra de déterminer les pertes dans la structure intermédiaire d'El Bhira et donc la fonction de transfert entre le barrage et la plaine de Kairouan, qui donnant les volumes effectivement parvenus à la zone de recharge de la nappe.

Les données du modèle sont constituées par les débits mesurés aux stations (CHAIEB *et al.*, 1995). L'évapotranspiration potentielle est calculée à l'aide de la formule de Riou (BOUZAIANE et LAFFORGUE, 1986).

L'oued Zeroud n'étant pas pérenne, la réserve initiale en eau du réservoir sol « *Si* » constitue la principale condition initiale du modèle. En cas d'apport préalable (cruie ou pluie) durant la période précédant la recharge, il suffit de démarrer les simulations à partir de la date de ce dernier événement en initialisant la réserve, par excès, à sa valeur maximale. Par suite, les simulations étant faites en continu sur toute la période de calage ou de validation, la réserve est calculée à chaque pas de temps par le modèle par application de l'équation du bilan, tenant compte de l'ETR. En l'absence d'apport au bief durant une période suffisamment longue, la réserve peut être initialisée à une valeur nulle. En effet, avec une ETP moyenne annuelle régionale de 1 800 mm/an, une réserve même maximale de 200 mm est épuisée au bout d'une période sans apport de 30 jours en été (juin à août) et de 120 jours en hiver (décembre à février).

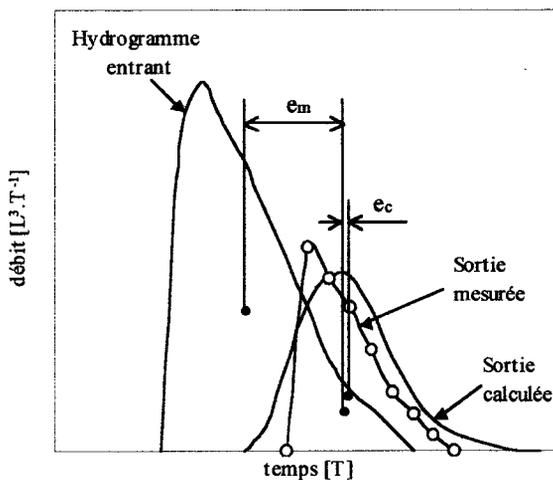


Figure 7 Comparaison des hydrogrammes de sortie calculé et mesuré.
Comparison between the calculated and measured outflow hydrographs.

Pour ajuster le modèle sur chaque bief, deux critères d'appréciation basés sur la comparaison des hydrogrammes sortants du bief ont été utilisés. La *figure 7* montre un exemple d'hydrogramme d'entrée d'un bief quelconque ainsi que les hydrogrammes de sortie mesurés et calculés correspondants. Ces critères sont :

- l'erreur sur le temps ou déphasage $eT = e_c/e_m$ qui représente le ratio du déphasage entre les centres de gravité des hydrogrammes de sortie mesuré et calculé, par l'intervalle de temps entre les centres de gravité des hydrogrammes d'entrée et de sortie mesurés du bief ;
- l'erreur sur le volume eV , ratio de la différence entre les volumes correspondant aux hydrogrammes de sortie mesurés et calculés par le volume correspondant à l'hydrogramme mesuré à la sortie du bief.

Tableau 1 Plage de variation des paramètres du modèle.

Table 1 Range of parametric variation.

Paramètre	Min.	Max.
RFU (mm)	10	200
K (mm/j)	100	1 200
β (m)	20	80
α (j ⁻¹)	0,2	0,8

Les tests préliminaires de sensibilité du modèle ont permis de fixer l'ordre de grandeur des paramètres (*tableau 1*), en tenant compte des valeurs avancées dans la littérature pour la région. Une longueur de maille de 250 m s'est en outre avérée adéquate pour simuler la propagation des ondes de lâchers.

Tableau 2 Valeurs ajustées des paramètres du modèle.

Table 2 Calibrated model parameters.

Paramètre	Bief 1	Bief 2	Bief 3
RFU (mm)	50	50	30
Ko (mm/j)	250	400	400
Ks (mm/j)	400	1 000	800
β (m)	35	40	40
α (j ⁻¹)	0,7	0,7	0,55
t_s (j)	10	8	5

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les valeurs des paramètres regroupées dans le *tableau 2*. Ces valeurs confirment la relative hétérogénéité constatée dans la lithologie des formations sous le lit de l'oued. En effet si la perméabilité au démarrage Ko reste la même dans la plaine (bief 2 et bief 3), la perméabilité stabilisée Ks est plus importante sur bief 2 (1 000 mm/j) là où les formations sont essentiellement perméables. Elle est en revanche de 800 mm/j sur le bief 3 situé plus en aval et où les formations argileuses sont prédomi-

nantes. Peu d'informations sont disponibles sur la lithologie du bief 1 correspondant au tronçon de la plaine d'El Bhira située en amont de celle de Kairouan. Dans cette zone, une perméabilité K comprise entre $K_0 = 250$ et $K_s = 400 \text{ mm/j}$ a permis d'aboutir à des résultats satisfaisants. La constante d'ajustement de la largeur inondée est retenue égale à 40 m dans toute la plaine, ce qui correspond à des largeurs inondées maximales variant entre 42 m en amont et 28 m à l'aval. La constante de tarissement du réservoir de transfert varie entre $0,55 \text{ j}^{-1}$ pour le bief 3 où la pente du lit de l'oued est plus faible (0,26 %) et $0,7 \text{ j}^{-1}$ à l'entrée de la plaine de Kairouan, là où la pente moyenne atteint 0,34 %.

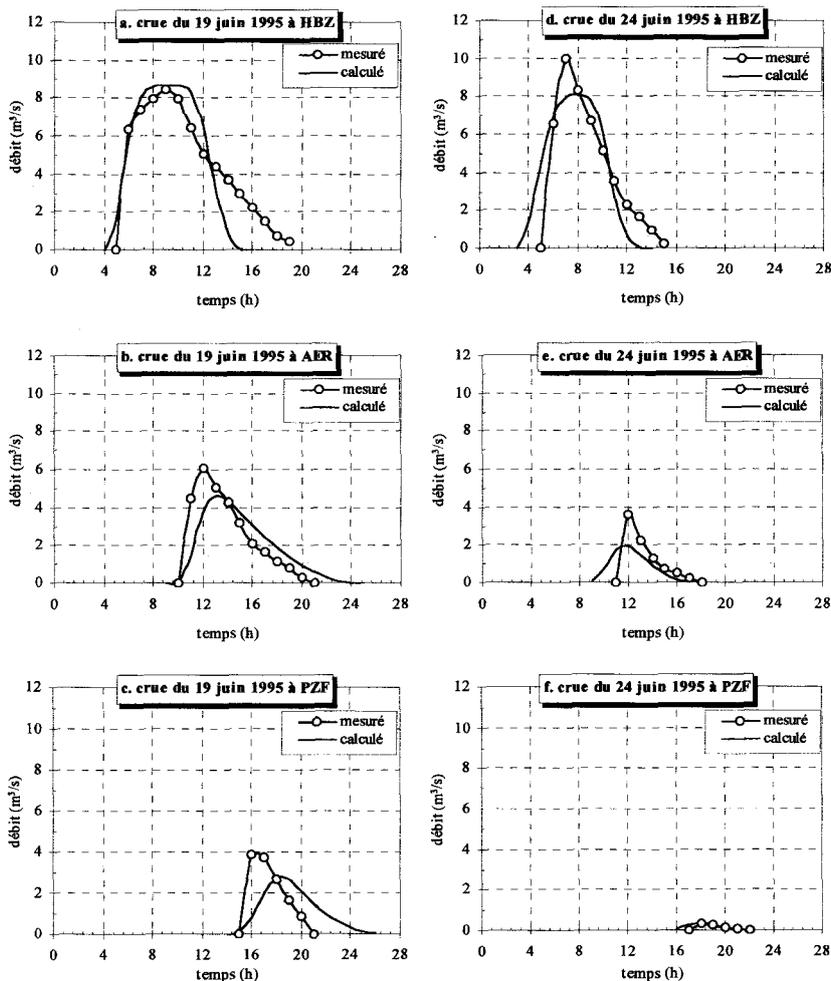


Figure 8 Hydrographes mesurés et calculés des ondes du 19 et 24 juin 1995 aux stations de contrôle : a : Henchir Bouzid (HBZ) ; b : Argoub Erremth (AER) ; c : Pont Zaâfrana (PZF).

Measured and calculated hydrographs for the flood waves of 19 and 24 June 1995 at the control stations: a: Henchir Bouzid (HBZ); b: Argoub Erremth (AER); c: Pont Zaâfrana (PZF).

La figure 8 présente les hydrogrammes mesurés et calculés aux stations de contrôle pour les ondes du 19 et 24 juin 1995. Les caractéristiques des hydrogrammes et les critères (eT , eV) obtenus pour toutes les ondes de crue de la période de calage sont récapitulés sur les tableaux 3, 4 et 5. D'une manière générale, les erreurs d'ajustement obtenues varient d'une onde à l'autre et selon la position du bief par rapport à l'entrée de la plaine. Elles découlent d'un compromis entre les deux critères de calage, avec toutefois une préférence pour eV lorsque cela s'avérait possible. En effet, les faibles débits observés et le peu de mesures réalisées à la station PZF augmentent les incertitudes sur les apports et la forme des hydrogrammes observés à cette station, d'où les difficultés d'ajustement de certaines ondes de crues sur le bief 3.

Pour le bief 1 (tableau 3), l'erreur sur eT est relativement stable, comprise entre 12 et 15 % avec une moyenne de 14 % sur toute la période. Pour le bief 2 en revanche (tableau 4), on note une assez grande disparité de eT d'une onde à l'autre, entre - 36 % pour l'événement du 19 juin et 18 % pour celui du 26 juin. La moyenne sur toute la période reste néanmoins acceptable autour de - 6 %. La même tendance s'observe au niveau du bief 3 (tableau 5), avec une nette amélioration pour les dernières crues. La moyenne des erreurs sur ce bief s'établit à 12 %.

Tableau 3 Caractéristiques des ondes de crue et valeurs des critères de calage sur le bief 1, entre le barrage et la station HBZ.

Table 3 Main characteristics of flood events and calibration criteria values on Reach 1 between Sidi Saâd Dam and the HBZ control station.

Crue	Date	Série observée			Série calculée			Critère d'erreur	
		Qmax. (m ³ /s)	Qmoy. (m ³ /s)	Apport (hm ³)	Qmax. (m ³ /s)	Qmoy. (m ³ /s)	Apport (hm ³)	eT (%)	eV (%)
1	19/06/1995	8,45	3,445	0,236	8,665	3,163	0,216	15,04	8,47
2	20/06/1995	9,42	3,986	0,201	8,558	4,119	0,208	13,24	- 3,48
3	21/06/1995	10,02	4,049	0,204	8,456	4,06	0,205	12,24	- 0,49
4	22/06/1995	9,69	3,538	0,166	8,329	3,669	0,172	15,55	- 3,61
5	23/06/1995	8,32	3,56	0,167	8,228	3,614	0,169	15,02	- 1,20
6	24/06/1995	9,94	3,495	0,164	8,127	3,563	0,167	15,06	- 1,83
Total	-	-	-	1,138	-	-	1,137	-	-

Qmoy : débit moyen ; Qmax : débit maximal ; eT : erreur sur le volume ; eV : erreur sur le temps.

L'erreur sur le volume eV est dans l'ensemble moins importante que celle sur le temps eT . Pour le bief 1 elle se situe entre - 3 et 9, avec une moyenne de - 0,36 %. Elle est en revanche plus importante et variable en aval. Quoique atteignant 40 % pour l'événement du 23 juin elle reste comprise entre - 9 et 12 % sur les biefs 2 et 3.

Lorsqu'on dispose de séries d'historiques de données suffisantes, le calage doit être validé en vérifiant que le modèle simule correctement des séries de données de référence non utilisées lors du calage. Pour le cas présent, la qua-

Tableau 4 Caractéristiques des ondes de crue et valeurs des critères de calage sur le bief 2, entre les stations HBZ et AER.**Table 4** Main characteristics of flood events and calibration criteria values on Reach 2 between the HBZ and AER control stations.

Crue	Date	Série observée			Série calculée			Critère d'erreur	
		Qmax. (m ³ /s)	Qmoy. (m ³ /s)	Apport (hm ³)	Qmax. (m ³ /s)	Qmoy. (m ³ /s)	Apport (hm ³)	eT (%)	eV (%)
1	19/06/1995	6,10	1,45	0,105	4,65	1,44	0,104	-36,46	0,95
2	20/06/1995	5,57	1,30	0,07	4,75	1,74	0,094	-4,60	-34,3
3	21/06/1995	5,84	1,81	0,085	4,22	1,68	0,079	0,99	7,06
4	22/06/1995	4,75	1,12	0,048	2,83	1,06	0,046	-0,89	4,17
5	23/06/1995	2,73	0,67	0,027	2,43	0,96	0,038	18,31	-40,70
6	24/06/1995	3,60	0,79	0,031	1,96	0,69	0,027	16,69	12,90
Total	-	-	-	0,366	-	-	0,387	-	-

Qmoy : débit moyen ; Qmax : débit maximal ; eT : erreur sur le volume ; eV : erreur sur le temps.

Tableau 5 Caractéristiques des ondes de crue et valeurs des critères de calage sur le bief 3, entre les stations AER et PZF.**Table 5** Main characteristics of flood events and calibration criteria values on Reach 3 between the AER and PZF control stations.

Crue	Date	Série observée			Série calculée			Critère d'erreur	
		Qmax. (m ³ /s)	Qmoy. (m ³ /s)	Apport (hm ³)	Qmax. (m ³ /s)	Qmoy. (m ³ /s)	Apport (hm ³)	eT (%)	eV (%)
1	19/06/1995	3,89	0,755	0,046	2,739	0,821	0,05	-52,20	-9,69
2	20/06/1995	3,37	0,822	0,035	1,9	0,738	0,032	-20,09	8,57
3	21/06/1995	2,92	0,768	0,033	2,242	0,843	0,036	-10,76	-9,09
4	22/06/1995	1,64	0,588	0,019	1,044	0,421	0,014	-3,60	26,32
5	23/06/1995	0,61	0,185	0,005	0,235	0,103	0,003	2,25	40,00
6	24/06/1995	0,37	0,106	0,003	0,321	0,13	0,004	9,98	-33,33
Total	-	-	-	0,141	-	-	0,139	-	-

Qmoy : débit moyen ; Qmax : débit maximal ; eT : erreur sur le volume ; eV : erreur sur le temps.

lité des données hydrométriques recueillies lors des autres campagnes de recharge ne permet pas un choix crédible d'autres séries pouvant servir pour une validation conséquente du calage. Même si le modèle peut être validé sur la période du 25 au 29 juin 1995 sur le bief 1, le manque de mesures à la station AER et les réserves soulevées plus haut sur le débit observés à PZF handicapent sérieusement la validation du modèle dans la zone de recharge de la nappe de Kairouan.

On pourra cependant, et à posteriori, vérifier à l'aide d'un modèle de simulation des écoulements souterrains que les volumes infiltrés calculés sont bien

à l'origine des remontées piézométriques observées suite aux recharges. Dans le cadre de ce papier et afin de conforter le calage, nous avons vérifié que le modèle simule raisonnablement les conditions réelles de la recharge sur la même période de calage, à savoir deux ondes lâchées quotidiennement du barrage dont une seule a fait l'objet de mesures aux stations. En effet, le calage du modèle sur la période du 19 au 24 juin 1995 à raison d'une seule onde simulée par jour peut ne pas rendre compte des conditions réelles d'infiltration dans le lit de l'oued et conduire en particulier à une sous-estimation des réserves en eau du sol entre deux jours consécutifs. Celle-ci se traduirait par une sous-estimation du volume infiltré.

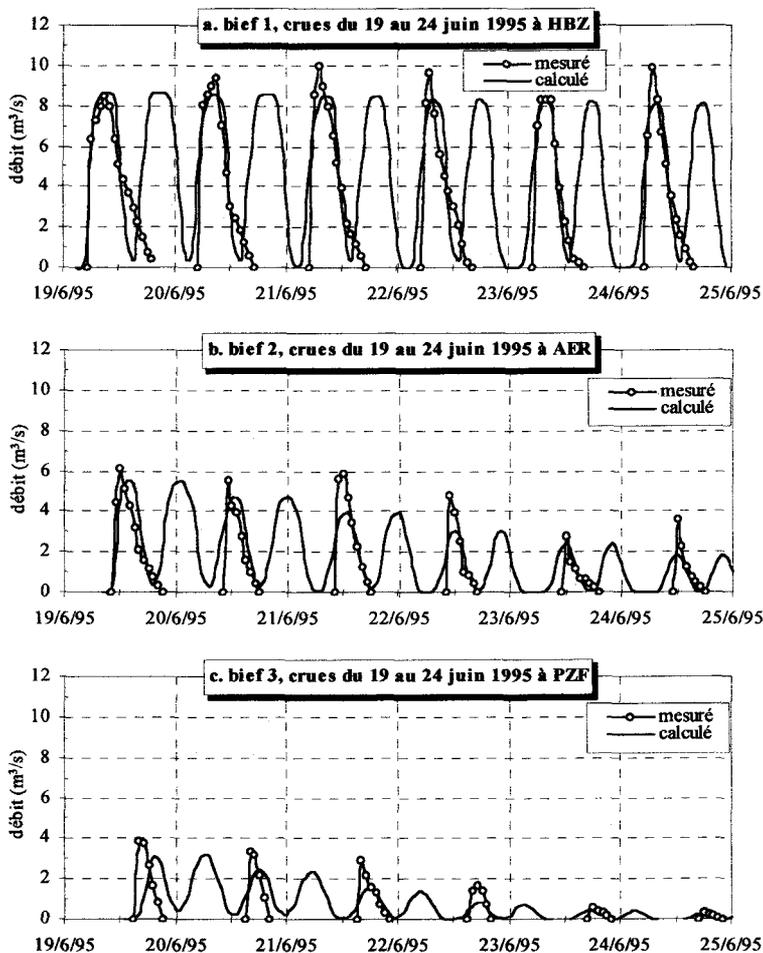


Figure 9 Vérification sur 2 ondes/jour : hydrogrammes mesurés et calculés du 19 au 24 juin 1995 à : a : Henchir Bouzid (HBZ) ; b : Argoub Erremth (AER) ; c : Pont Zaâfrana (PZF).

Vérification on 2 flood waves/day: measured and calculated hydrographs from 19 to 24 June 1995 at: a: Henchir Bouzid (HBZ); b: Argoub Erremth (AER); c: Pont Zaâfrana (PZF).

La figure 9 illustre les hydrogrammes de sortie mesurés et calculés à l'aide du modèle sur chaque bief en raison de deux ondes de crue lâchées par jour. Elle montre que les hydrogrammes calculés présentent une allure conforme aux mesures, même si quelques anomalies persistent notamment sur le bief 3 où l'ordre de grandeur des débits mesurés est le plus faible. L'erreur eV comise sur les volumes calculés par rapport à ceux mesurés correspondants varie entre - 3 % sur le bief 1 à la station HBZ et 19 % sur le bief 3 à PZF.

5 - EXPLOITATION DU MODÈLE

Le modèle de propagation et d'infiltration des lâchers ainsi calé et vérifié a été utilisé pour visualiser la propagation des ondes de lâchers le long de l'oued et réaliser un bilan global de la recharge réalisée sur l'oued Zeroud. Au préalable, il s'avère fort intéressant, pour une gestion exhaustive de la recharge, de déterminer la fonction de transfert entre le barrage et la plaine de Kairouan, laquelle permettra d'évaluer les pertes dans la structure d'El Bhira. La fonction de transfert permet la prédiction du volume effectivement parvenu à la plaine en fonction du volume lâché au barrage. L'ajustement des résultats de simulation à une loi linéaire a donné le résultat de la figure 10, avec un coefficient de détermination assez proche de l'unité (0,98).

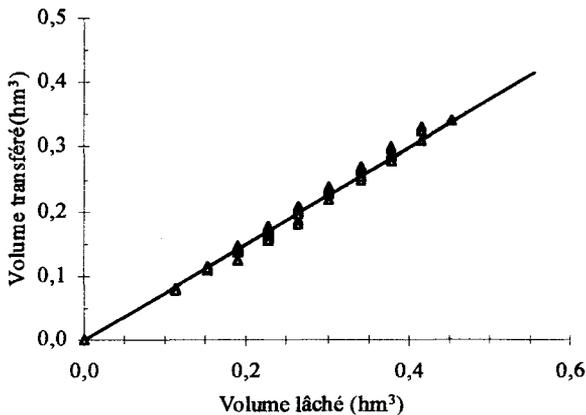


Figure 10 Prédiction du volume de transfert entre le barrage de Sidi Saâd et la plaine de Kairouan.

Prediction of the transferred volume between the Sidi Saâd dam and the plain of Kairouan.

5.1 Propagation des ondes de crues

Le phénomène de propagation des ondes de crue dans le lit de l'oued est important dans le processus de l'infiltration. Il détermine la durée de l'infiltration qui correspond au temps de parcours du tronçon de l'oued favorable à l'ali-

mentation des nappes par de l'onde de crue. Grâce à la discrétisation du lit de l'oued, des hydrogrammes peuvent être générés à des sections fictives permettant ainsi de suivre l'évolution dans le temps et l'espace des débits lâchés au barrage.

La figure 11 présente la propagation du débit de l'onde du 19 juin 1995 le long du lit de l'oued. Les hydrogrammes ont été calculés à des sections équidistantes de 2 km, sur tout le parcours de l'oued entre le barrage et la station de Pont Zaâfrana (PZF). 4 heures 43 minutes ont été nécessaires à l'onde pour parcourir le trajet de 15 km séparant le barrage de la plaine de Kairouan avec une vitesse de propagation de 0,883 m/s. Un délai relativement plus important serait indispensable pour parcourir une distance équivalent dans la plaine, entre les stations HBZ et AER soit une vitesse de 0,858 m/s. Il fallait en revanche pas moins de 5 heures 40 minutes pour parcourir les 10 km séparant AER de PZF, avec donc une vitesse de propagation de 0,49 m/s.

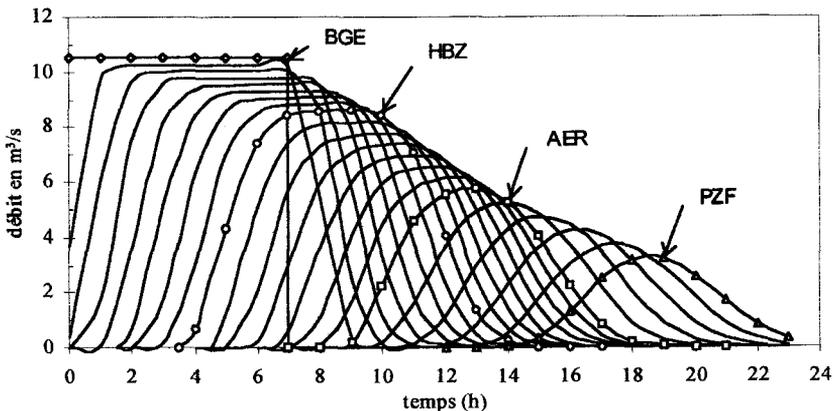


Figure 11 Propagation de l'onde du 19 juin 1995, hydrogrammes calculés aux sections : BGE : barrage de Sidi Saâd ; HBZ : Henschir Bouzid ; AER : Argoub Erremth ; PZF : Pont Zaâfrana.

Propagation of the flood event of 19 June 1995, calculated hydrographs at the sections: BGE: Sidi Saâd dam; HBZ: Henschir Bouzid; AER: Argoub Erremth; PZF: Pont Zaâfrana.

D'une manière générale, la vitesse de propagation de l'onde de crue le long d'un bief dépend des caractéristiques hydrodynamiques du lit (pentes du lit et de frottement, largeur inondée) et de l'hydrogramme d'entrée. Les valeurs ci-dessus reflètent en effet l'ordre de variation de la pente de lit et du volume des hydrogrammes qui décroissent d'amont en aval.

5.2 Bilan de la recharge

Afin d'établir le bilan des recharges effectuées depuis la mise en eau du barrage, le modèle a été appliqué sur quatre campagnes de recharge à savoir celles de 1988, 1990, 1994, et 1995. L'objectif étant de réaliser le bilan hydrologique global de la recharge pour estimer les pertes dans la structure d'El Bhira, l'évapotranspiration, le volume ruisselé à l'aval de PZF et la quantité infil-

Tableau 6 Volumes des lâchers au barrage et apports calculés aux stations de contrôle à l'aide du modèle.**Table 6** Dam spreading volumes and modeled flow rates at the control stations.

Campagne	Barrage (BGE)			Henchir Bouzid (HBZ)			Argoub Erremth (AER)			Pont Zaâfrana (PZF)		
	débit lâché (m ³ /s)	Durée (h)	V _L (hm ³)	V _{HBZ} (hm ³)	% Bge (%)	% HBZ (%)	V _{AER} (hm ³)	% Bge (%)	% HBZ (%)	V _{PZF} (hm ³)	% Bge (%)	% HBZ (%)
1988	16,2	80,5	4,572	3,439	75,22	100	0,675	14,76	19,63	0,156	3,41	4,54
1990	18,3	366,4	24,136	20,09	83,23	100	9,707	40,22	48,32	4,992	20,68	24,85
1994	10,6 à 17,8	523,3	20,752	14,085	67,87	100	2,573	12,40	18,27	0,436	2,10	3,10
1995	10,3 à 10,5	406,5	15,253	10,847	71,11	100	2,323	15,23	21,42	0,492	3,23	4,54
Total	-	1 462	64,713	48,459	74,88	100	15,278	23,61	31,53	6,076	9,39	12,43

VL : volume lâché au barrage ; V_p : volume « perdu » dans la plaine d'El Bhira ; V_E : volume évaporé ; V_i : volume infiltré dans la plaine de Kairouan ; ΔV_R : variation des réserves ; V_R : volume ruisselé en aval de la zone de recharge ; V_{HBZ} : volume d'apport à la station HBZ ; V_{AER} : volume d'apport à la station AER ; V_{PZF} : volume d'apport à la station PZF ; % Bge : pourcentage d'apport par rapport au volume total lâché au barrage ; % HBZ : pourcentage d'apport par rapport au volume d'apport à la station HBZ (entrée de la plaine de Kairouan).

Tableau 7 Bilan de la recharge calculé à l'aide du modèle.**Table 7** Assessment of artificial recharge predicted by model.

Campagne	Barrage		Plaine d'El Bhira		Plaine de Kairouan							
			Volume des pertes		Évaporation		Infiltration		Variation de réserve		Ruissellement aval	
	V_L (hm^3)	% Bge (%)	V_P (hm^3)	% Bge (%)	V_E (hm^3)	% Bge (%)	V_I (hm^3)	% Bge (%)	ΔV_R (hm^3)	% Bge (%)	V_R (hm^3)	% Bge (%)
1988	4,572	100	1,134	24,80	0,059	1,29	3,185	69,66	0,039	0,85	0,155	3,39
1990	24,136	100	4,057	16,81	0,144	0,60	14,904	61,75	0,039	0,16	4,992	20,68
1994	20,752	100	6,667	32,13	0,265	1,28	13,794	66,47	0,038	0,18	0,436	2,10
1995	15,253	100	4,4	28,85	0,234	1,53	10,088	66,14	0,039	0,26	0,492	3,23
Total	64,713	100	16,26	25,12	0,702	1,08	41,971	64,86	0,155	0,24	6,075	9,39

VL : volume lâché au barrage ; V_P : volume « perdu » dans la plaine d'El Bhira ; V_E : volume évaporé ; V_I : volume infiltré dans la plaine de Kairouan ; ΔV_R : variation des réserves ; V_R : volume ruisselé en aval de la zone de recharge ; V_{HBZ} : volume d'apport à la station HBZ ; V_{AER} : volume d'apport à la station AER ; V_{PZF} : volume d'apport à la station PZF ; % Bge : pourcentage d'apport par rapport au volume total lâché au barrage ; % HBZ : pourcentage d'apport par rapport au volume d'apport à la station HBZ (entrée de la plaine de Kairouan).

trée vers la nappe. Les données disponibles sont les débits lâchés, les heures d'ouverture et de fermeture des vannes du barrage et les volumes totaux mobilisés pour chaque campagne. Les valeurs d'ETP moyenne mensuelle calculées à l'aide de la formule de Riou ont été également utilisées. Pour tenir compte de l'augmentation de la vitesse d'infiltration dans les premiers jours de recharge, les paramètres t_s , K_0 et K_s obtenus lors du calage précédent ont été appliqués. Pour chaque épisodes de recharge, les simulations ont été effectuées en continu sur le toute le période de lâchers.

Les résultats sont consignés sur les *tableaux 6* et *7*. La répartition des apports au niveau des stations de contrôle (*tableau 6*) montre que le volume VHBZ parvenu à la station HBZ, entrée de la plaine représente entre 71 et 83 % du volume lâché au barrage. L'ensemble des campagnes de recharge montre qu'en moyenne 75 % du volume total lâché au barrage parviennent jusqu'à la plaine de Kairouan, soit des pertes en volume de 25 % dans la plaine d'El Bhira. Seulement 24 % du barrage soit 32 % du volume parvenu à la plaine arrive à AER après un parcours de 15 km. Le volume de ruissellement au-delà de PZF représentera 9 % du volume total soit 12 % de l'apport à l'entrée de la plaine.

Le bilan détaillé de la recharge (*tableau 7*) montre que le volume total infiltré vers la nappe s'élève à près de 42 millions de m^3 soit 65 % du volume total de 65 millions de m^3 lâché. Le reste étant réparti entre l'évaporation dans la plaine (1 %), et le ruissellement à l'aval de Pont Zaâfrana (9 %).

Ces résultats dénotent de l'importance des pertes de recharge estimées à plus de 35 % du volume mobilisé au barrage, dont 25 % dans la plaine d'El Bhira. Afin de minimiser ces pertes et à l'instar des équipements déjà initiés, il serait opportun de mettre en place une conduite d'aménée entre le barrage et la plaine de Kairouan, de capacité suffisante pour débiter 6 à 8 m^3/s juste à l'entrée de la plaine. Ce débit s'avère suffisant pour garantir une infiltration respectant les conditions naturelles de recharge de la nappe sur tout le tronçon favorable. De plus, des lâchers par paliers de débits moins importants au début de la campagne contribueront à réduire les pertes par ruissellement à l'aval.

6 – CONCLUSIONS

Pour pallier le déséquilibre piézométrique engendré par la construction des barrages en zone semi-aride, la recharge artificielle par lâchers dans les lits d'oueds apparaît comme une technique prometteuse dès lors que l'on en maîtrise les pertes parfois très importantes.

Dans le cas des nappes de la plaine de Kairouan, l'analyse de l'évolution des débits de pointe mesurés aux stations a révélé une variation des propriétés d'infiltration de la zone non saturée sous le lit de l'oued Zeroud. Comme l'ont démontré plusieurs travaux de recherches antérieurs, la présence de l'air dans la zone non saturée a une influence négative sur la capacité d'infiltration du milieu poreux. Faible au début, celle-ci augmente au fur et à mesure que l'air s'échappe en surface, jusqu'à atteindre une valeur permanente.

Pour simuler la propagation et l'infiltration des lâchers dans le lit de l'oued et réaliser le bilan hydrique de la recharge, un modèle hydrologique discrétisé basé sur le principe de la fonction de production « type sol » des modèles à réservoirs a été mis au point. Les paramètres du modèle sont déterminés par calage pour chaque bief de l'oued. Afin de tenir compte de l'augmentation de la vitesse d'infiltration une loi de variation linéaire de celle-ci a été intégrée au modèle.

L'ajustement du modèle sur un échantillon de 6 événements de lâchers a donné des résultats satisfaisants. Bien que la validation reste insuffisante en raison de la rareté des données, ce modèle peut constituer un premier outil d'évaluation de l'efficacité de la recharge. Les résultats montrent que 65 % du volume total lâché s'infiltré vers la nappe et que l'importance des pertes (35 %) nécessite des dispositions particulièrement indispensables pour une meilleure efficacité de la recharge.

Même si l'hypothèse bien fondée de la variabilité temporelle de l'infiltration s'est avérée satisfaisante, les estimations de ce modèle par ailleurs déjà testé sur l'épandage des crues devraient être validées « par l'aval » en vérifiant que le modèle hydrogéologique utilisant cette recharge comme entrée simule raisonnablement le comportement de la nappe recevant cette alimentation.

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire de modélisation en hydraulique et environnement (LMHE) de l'École nationale d'ingénieurs de Tunis (ENIT) et la Direction générale des ressources en eaux (DGRE) du ministère de l'Agriculture de la République tunisienne. Nous remercions M. ZAMMOURI et H.CHAIEB pour leur précieuse contribution. Nous tenons également à remercier vivement les réviseurs anonymes de la revue qui, par leurs suggestions et remarques pertinentes ont contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADJELI M., CHADLY B., 1995. Recharge de la nappe de Kairouan par les lâchers du barrage de Sidi Saâd, campagne avril-juin 1994. DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport interne*, 41 p.
- BESBES M., 1975. Étude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur Modèles mathématiques. CIG-EMP/DGRE, Fontainebleau, France, *Rapport scientifique LHM/RD/75/16*, 121 p.
- BESBES M., 1978. Estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle d'infiltration efficace. *Th. Doct. es. Sc.*, Univ. Paris VI, 270 p.
- BESBES M., BOUZAIANE S., 1984. Étude de l'irrigation par épandage des eaux de crue de l'oued Fekka et recharge de la nappe de Sidi Bouzid. Un modèle mathématique de simulation. ENIT/DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport scientifique*, 30 p.

- BESBES M., DE MARSILY G., 1984. From infiltration to recharge: use of a parametric transfer function. *J. Hydrol.*, 74, 271-293.
- BOUZAIANE S., CHAIEB H., MAALEL F., 1993. Recharge des nappes de Kairouan par les lâchures du barrage de El Haouareb sur l'oued Merguellil, campagne du 19 avril au 8 mai 1993. DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport de Synthèse*, 23 p.
- BOUZAIANE S., LAFFORGUE A., 1986. Monographie des oueds Zeroud et Merguellil. ORSTOM / DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport scientifique*, 600 p.
- CHAIEB H., CHADLY B., AYACHI M., 1995. Note sur la recharge de la nappe de Kairouan par les lâchers du barrage de Sidi Saâd, campagne du 19 juin au 19 juillet 1995. DGRE, Tunis, Tunisie, *note interne*, 10 p.
- CUNGE J.A., 1969. On the subject of flood propagation computational method (Muskingum method). *J. Hydraul. Res.*, 7(2), 205-230.
- DALUZ V.J.H., 1983. Conditions governing the use of approximations for Saint-Venant equations for shallow water flow. *J. Hydrol.*, 60, 43-58.
- DGRE, 1990. Situation de l'exploitation des nappes phréatiques. DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport*, 96 p.
- DGRE, 1996. Annuaire d'exploitation des nappes profondes. DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport*, 365 p.
- DJEBBI M., BESBES M., MAALEL K., 1991. Modèle d'épandage des eaux des crues dans les régions arides « MECRA ». Notice et exemple d'utilisation. ENIT, Tunis, Tunisie, *Rapport scientifique*, 21 p.
- EZZEDDINE S., BESBES M., 1991. un modèle hydrologique à réservoirs pour la simulation des épandages des crues. *Les Annales Maghrébines de l'ingénieur*, 5(2), 105-126.
- GIRARD G., 1982. Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs. Modèle MODLAC. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 19(2), 55-72.
- GRISMER M.E., ORANG M.N., CLAUSNITZER V., KINNEY K., 1994. Effects of air compression and counterflow on infiltration into soils. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120(2), 775-795.
- KOLBERG F.J., HOWARD A.D., 1995. Active channel geometry and discharge relations of U.S. piedmont and midwestern streams : the variable exponent model revisited. *Water Resour. Res.*, 31(9), 2353-2365.
- LAMBERTI P., PILATI S., 1996. Flood propagation models for real-time forecasting. *J. Hydrol.*, 175, 239-265.
- LEDOUX E., GIRARD G., VILLENEUVE J.P., 1984. Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, 1, 101-110.
- MOREL-SEYTOUX H.J., BILLICA A.J., 1985. A two-phase numerical model for prediction of infiltration: application to a semi-infinite soil column. *Water Resour. Res.*, 21(04), 607-615.
- MOREL-SEYTOUX H.J., KHANDJI J., 1974. Derivation of an equation of infiltration. *Water Resour. Res.*, 10(4), 795-800.
- MOUSSA R., BOCQUILLON C., 1996. Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *J. Hydrol.*, 186, 1-30.
- NAZOU MOU Y., 1996. Modélisation de la recharge artificielle des nappes de la plaine de Kairouan. *Mémoire de DEA*, ENIT, Tunis, Tunisie, 104 p.
- ORLANDINI S., ROSSO R., 1998. Parameterization of stream channel geometry in distributed modeling of catchment dynamics. *Water Resour. Res.*, 34(8), 1971-1985.
- PARK C.C., 1977. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels. An analysis and some observations. *J. Hydrol.*, 33, 133-146.
- PONCE V.M., LI R.M., SIMONS D.B., 1978. Applicability of kinematic and diffusion wave. *J. Hydraul. Div. ASCE*, 104(HY3), 353-360.
- PONCE V.M., 1986. Diffusive wave modeling of catchment dynamics. *J. Hydraul. Eng.*, 112(8), 716-727.
- PONCE V.M., 1990. Generalized diffusive wave equation with inertial effects. *Water Resour. Res.*, 26(5), 1099-1101.
- PONCE V.M., YEVJEVICH V., 1978. Muskingum-Cunge method with variable parameters. *ASCE J. Hydraul. Div.*, 104(HY12), 1663-1667.

- ROCHE M., 1971. Les divers types de modèles déterministes. *La Houille Blanche*, 2, 111-128.
- SAÂDAOUI M., JERIDI M., AYACHI M., 1989. Recharge de la nappe de Kairouan par les lâchures du barrage de Sidi Saâd. DGRE, Tunis, Tunisie, *Note interne*, 32 p.
- SANDER G.C., PARLANGE J.-Y., HOGARTH W.L., 1988. Air and water flow, II, gravitational flow with arbitrary flux boundary condition. *J. Hydrol.*, 99, 225-234.
- VACHAUD G., GAUDET J.P., KURAZ V., 1974. Air and water flow during ponded infiltration in a vertical bounded column. *J. Hydrol.*, 22, 89-108.
- VACHAUD G., VAUCLIN M., KHANDJI D., WAKIL M., 1973. Effect of air pressure on a water flow in an unsaturated stratified vertical column of sand. *Water Resour. Res.*, 9(1), 160-173.
- WANG Z., FEYEN J., NIELSEN D.R., van GENUCHTEN M.T., 1998. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resour. Res.*, 34(2), 213-222.
- WEIR J.G., KISSLING M.W., 1992. Influence of air flow on the vertical infiltration of water into soil. *Water Resour. Res.*, 28(10), 2765-2772.